

EVALUACIÓN MULTIESTACIONAL DE LA CONTAMINACIÓN POR MERCURIO
EN AGUA EXTRAIDA DEL RÍO LENGUAZAQUE, EN EL MUNICIPIO DE
LENGUAZAQUE, CUNDINAMARCA

PAULA TATIANA MORA MENA



UNIVERSIDAD LIBRE
FACULTAD DE INGENIERIA

ABRIL 2019

EVALUACIÓN MULTIESTACIONAL DE LA CONTAMINACIÓN POR MERCURIO
EN AGUA EXTRAIDA DEL RÍO LENGUAZAQUE, EN EL MUNICIPIO DE
LENGUAZAQUE, CUNDINAMARCA

PAULA TATIANA MORA MENA 64131102

DIRECTOR: MSC. RAFAEL NIKOLAY AGUDELO VALENCIA

UNIVERSIDAD LIBRE

FACULTAD DE INGENIERIA

PROGRAMA INGENIERIA AMBIENTAL

ABRIL 2019

El trabajo de grado titulado *Evaluación multiestacional de la contaminación por mercurio en agua extraída del río Lenguaque, en el municipio de Lenguaque, Cundinamarca*, realizado por la estudiante Paula Tatiana Mora Mena con código 64131102, cumple con los requisitos legales exigidos por la Universidad Libre para optar al título de Ingeniera Ambiental.

DIRECTOR: RAFAEL NIKOLAY AGUDELO VALENCIA

FIRMA JURADO

FIRMA JURADO

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios por este logro, por permitirme cumplir mi sueño de ser ingeniera, y ponerme en el lugar y en el momento para que aprendiera y continuara creciendo. Gracias a mi padre por ser mi inspiración y mi protección, a mi madre por ser pilar de quien soy, gracias a su fortaleza, amor, comprensión y apoyo en cada momento, a mis hermanas por ser mis compañeras. Gracias a James Bottomley por respaldarme y mantener mi fe enfocada. Gracias a Nikolay, por estar siempre dispuesto a enseñarme, y por aportar a mi vida un valor profesional y humano incalculable.

Gracias, gracias, gracias

RESUMEN

El problema del mercurio es ampliamente relacionado con la minería de oro en Colombia, sin embargo, evidencias señalan que dentro el carbón, se encuentra el mercurio como parte de este, en una proporción de 1 ppm. El municipio de Lenguaque, realiza desde décadas atrás minería de carbón, para la producción de coque mediante procesos de quema en donde se libera el mercurio presente en el carbón, estas emisiones tienen repercusión en el ambiente, depositándose de en el suelo y fuentes hídricas. El principal río del municipio, el río Lenguaque, es fuente de abastecimiento de actividades ganaderas y agrícolas, y también de consumo humano, se encuentra en un área de gran interés, ya que se encuentra rodeado de hornos de coquizado y zonas mineras, las cuales desprenden mercurio a través de la quema; para monitorear este hecho se seleccionaron cinco puntos, evaluados durante cuatro meses en un periodo de seco a lluvioso.

Palabras clave: Mercurio, Carbón, Emisiones atmosféricas, Lenguaque, Precipitación.

ABSTRACT

Mercury's problems is widely related to gold mining in Colombia, however, evidence indicates that within the coal, mercury is found as part of it, in a proportion of 1 ppm. Lenguazaque, has been mining coal for decades, for the production of coke by burning processes where the mercury present in the coal is released, these emissions have an impact on the environment, being deposited in the soil and water sources. The main river of the municipality, Lenguazaque River, is a source of supply of livestock and agricultural activities, and also of human consumption, it's located on an area of great interest, since it is surrounded by coking ovens and mining areas, which they release mercury through burning; To monitor this fact, five points were selected, evaluated during four months in a dry to rainy period.

Keywords: Mercury, Coal, Atmospheric emissions, Lenguazaque, Precipitations.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCION	9
2.	JUSTIFICACIÓN.....	11
3.	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	13
4.	OBJETIVOS	16
3.1	OBJETIVO GENERAL.....	16
4.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	16
4.	ANTECEDENTES.....	17
4.1	CASOS DE CONTAMINACIÓN.....	17
4.2	MERCURIO EN CARBÓN	19
4.3	MINERÍA DE CARBÓN EN CUNDINAMARCA.....	21
5.	MARCO REFERENCIAL.....	25
5.1	MARCO TEÓRICO.....	25
5.2	MARCO CONCEPTUAL	26
5.2.1	Minería de Carbón.....	26
5.2.2	Sedimentos.....	27
5.2.3	Metales Pesados	27
5.2.4	Mercurio (Hg)	28
5.2.5	Metilmercurio.....	29
5.3	MARCO GEOGRÁFICO.....	29
5.4	MARCO LEGAL	34
6.	MARCO METODOLÓGICO.....	38
7.	MUESTREO Y ANÁLISIS	45
7.1	MUESTREO EN CAMPO	45
8.	ANALISIS Y RESULTADOS	53
9.	CONCLUSIONES	60
10.	RECOMENDACIONES	61
11.	REFERENCIAS.....	62

Lista de Tablas

Tabla 1 Marco Normativo sobre Hg.....	35
Tabla 2 Estándares para la curva de calibración de Hg	42
Tabla 3 Concentraciones para la curva de calibración para el análisis de Hg.....	42
Tabla 4 Puntos de muestreo y distancia de los puntos de muestreo.	52
Tabla 5 Valores de concentraciones de Hg, error estándar, porcentaje de error, y valores de pH de las muestras de febrero, marzo, abril y mayo.....	53

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1 Emisiones atmosférica de las actividades de Carbocoque en el municipio de Lenguazaque.....	46
Ilustración 2 Lugar de toma de muestra (1er punto de muestreo).....	47
Ilustración 3 Lugar de toma de muestra (2do punto de muestreo)	48
Ilustración 4 Depósitos de los remanentes de las actividades de la empresa Carbocoque.....	49
Ilustración 5 a) Lugar de toma de muestra (3er punto de muestreo). b) Lugar de toma de muestra (4to punto de muestreo).	50
Ilustración 6 Lugar de toma de muestra (5to punto de muestreo)	51
Ilustración 7. Apariencia del agua de río en el punto de muestreo número 2.....	58

1. INTRODUCCION

El mercurio es un metal un metal pesado que se encuentra en estado líquido, miscible fácilmente en el agua, y de gran volatilidad. Este elemento se destaca por su toxicidad y por contaminar agua, suelos y aire, y en contacto con el agua puede ser muy peligroso puesto que la fauna del medio puede ingerirla y modificarla, en su forma metilada, la cual es más peligrosa, y puede ascender a los humanos por medio del consumo de este alimento.

Este metal es más estudiado dentro de las actividades realizadas de extractivas de oro, sin embargo, se encuentra referencias que señalan la proporción del metal en la forma natural del carbón, siendo este liberado a la atmósfera por procesos de combustión, quedando libre en el aire. En Colombia los estudios realizados con enfoque a la contaminación del mercurio, se encuentra asociada a los vertimientos de minería de oro, en las cuencas de los ríos Magdalena, Cauca y Atrato. Señalado lo anterior, se encuentra poca información evidenciando la contaminación por mercurio en fuentes hídricas por actividades de explotación y combustión del carbón, además de ser Colombia un país que tiene yacimientos de carbón en diferentes zonas del país, y en la que la mayoría de la producción de carbón, es para fines de combustión, o generación de coque, también es uno de los países de mayor producción de carbón a nivel mundial, y el primer país de producción de carbón a nivel Latinoamérica.

Yacimientos de carbón se encuentran principalmente en Guajira, Santander, Boyacá y Cundinamarca, donde se han encontrado formaciones rocosas que durante décadas han permitido la explotación de estas zonas, que han adoptado como tradición esta actividad. En el caso de Cundinamarca, se encuentra la falla de Guaduas, formación que se encuentra compuesta por metales y otros, siendo su composición óptima para uso en industria metalúrgica y térmica. Sobre esta formación, está ubicado el municipio de Lenguaque, el cual tiene uno de los niveles más alto de producción de coque y explotación de carbón dentro del departamento de Cundinamarca. Este municipio, tiene diferentes lugares donde se ejercen la extracción del carbón y la quema de esta para la obtención de coque, y no se cuenta con medidas que controlen las emisiones atmosféricas que son arrojadas al medio ambiente, sin tener en cuenta la cercanía de fuentes hídricas, la cual es fuente de abastecimiento para consumo humano, y actividades de ganadería y agricultura que se encuentran alrededor del río.

Se determinaron cinco sitios de muestreos en el río, las cuales fueron tomadas en el mismo lugar durante cuatro meses consecutivos, para ser determinadas bajo Espectrometría de Absorción Atómica, para la lectura de los datos, luego de ello, los resultados fueron comparados con las precipitaciones acumuladas de los meses de Febrero a Mayo del 2018, periodo en donde se tomaron las muestras, esto para encontrar un comportamiento de los resultados obtenidos.

2. JUSTIFICACIÓN

El municipio de Lenguazaque se caracteriza por una fuerte producción agrícola, principalmente papa y alverja, así mismo, la explotación minera de carbón en socavón representa un motor de desarrollo para la economía del municipio, datos encontrados de la UPME, demuestran que este municipio tiene amplio potencial de explotación carbonífera, teniendo una producción anual de 356.934,50 toneladas, estando por debajo de los municipios de Cucunubá y Guacheta, los cuales presentan mayor producción (UPME, 2014). La topología de la región favorece la explotación del carbón, ya que bajo esta área se encuentran camas de carbón que hacen parte de la formación de Guaduas, una formación caracterizada por la presencia de carbón que se extiende en diferentes municipios que practican actividades mineras de este tipo (García & Jiménez, 2016).

En el municipio de Lenguazaque, no solo se llevan a cabo actividades extractivas, además de ello, cuenta con industrias en las cuales se realiza transformación de carbón para producción de coque, destacándose la empresa Carbocoque ubicado en este municipio, con producciones de coque alrededor de 2 millones de toneladas de coque anuales, las cuales se envían a más de 25 países (Semana, 2017). El proceso de coquización, se caracteriza por retirar la humedad y el ajuste de la relación C:H:O, a fin de incrementar el contenido de carbono en el carbón, es por esto que el carbón coque, se caracteriza por que su contenido de carbón varía entre el 95% y el 98% (Klages, 1968). Ming-Ho Yu, en su libro *Environmental Toxicology*.

Biological and health effects of pollutants, señala el carbón existente en el mundo, contiene alrededor de 1 ppm de mercurio (2011), conforme a lo anterior, existe la posibilidad de presencia de mercurio en el agua del río Lenguaque, como efecto de deposición luego de ser liberadas las emisiones atmosféricas de los hornos de coquizado y por mala disposición de residuos de carbón.

Como bien se sabe, el mercurio presenta múltiples efectos adversos sobre la salud de los seres vivos, alterando órganos y funciones vitales, incluso generando cambios a nivel genético (Sundseth et al, 2017), este elemento al no ser un objeto de estudio común, con el enfoque ligado a las actividades asociadas al uso de carbón, constituye una razón fundamental por la cual es necesario evaluar si existe la presencia de mercurio en un esquema enmarcado por actividades del carbón, puesto que el mercurio representa un riesgo dado a que el uso de las aguas se despliegan para distintos fines, como lo son para riego de cultivos, para el abastecimiento de ganado, y consumo humano, de esta manera este elemento también presenta consecuencias ambientales negativas por el hecho del proceso de bioacumulación y transformación a metilmercurio, por ello cabe resaltar la importancia de un estudio que permita establecer la presencia de mercurio en el agua de río.

3. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La minería en Colombia constituye un pilar de desarrollo económico. Durante los últimos años este enfoque extractivista se ha intensificado, así lo confirman las metas de gobierno contenidas en los últimos Planes de Desarrollo (UPME, 2014). Desde el año 2006 y durante más de una década, estos planes se proyectaron para fortalecer el sector minero-energético (además de las estrategias planteadas en el CONPES de 1997), en el que se esgrimen tácticas para el desarrollo del sector (UPME, 2006), dado que algunas regiones del país cuentan con una larga tradición minera en la explotación de carbón, oro, níquel y materiales de construcción, por el cual la nación es mayormente reconocida a nivel internacional (Minminas, 2016).

El enfoque que tomo el país en cuanto a la minería, ha dado lugar a que los recursos minerales sean un tema prioritario, hecho por el cual se propende por el cumplimiento de parámetros técnicos, económicos, laborales, ambientales y sociales que contribuya al desarrollo local y nacional (UPME, 2014). El mayor número de empresas mineras existentes en el territorio nacional son de pequeña escala y representan un reto para el país en términos de control, seguimiento y homogenización de estas actividades (Minminas, 2016).

Con relación a la evolución de las medidas adoptadas para las distintas prácticas extractivas efectuadas en el país, las actividades en las cuales se hace uso de mercurio presentan un gran interés a causa de los efectos negativos que este elemento puede causar a la salud de seres vivos, y el ambiente (UPME, 2014).

Debido a los riesgos que representa el mercurio para la salud humana, las enfermedades que este elemento produce por efecto de contacto prolongado en los seres humanos van desde dolores de cabeza, pérdida de memoria, afectaciones de la capacidad motriz, hasta la ceguera (Weinberg & IPEN, 2010). Las actividades antrópicas representan o constituyen la principal fuente de liberación de mercurio al ambiente, la minería de carbón da lugar a la liberación de mercurio en los procesos de coquizado y combustión. Autores como Antoszczyszyn y Michalska (2016), reportan sobre la contaminación de mercurio, en pilas de residuos provenientes de la extracción de carbón y de actividades resultantes de esta industria, las concentraciones encontradas llegan hasta 380 ppb. El mercurio luego de verse inmerso en la atmósfera, fijarse en el suelo, y entrar en contacto con el medio acuático, tiende a metilarse, es decir, a formar metil mercurio y bajo esta forma puede ingresar a la cadena trófica (Minminas, 2014).

Lo anterior representa una causa probable del hallazgo de contenido de mercurio en los cuerpos de agua, los cuales se encuentran cerca a lugares donde se disponen residuos de carbón, además de las emisiones de mercurio que son liberadas a la atmósfera en los procesos de coquizado y combustión. El municipio de Lenguaque se encuentra en una zona caracterizada por actividades extractivas de carbón y coquizado, por otra parte el río Lenguaque, fuente de agua para el municipio, recorre el área donde se encuentran distintas minas y el casco urbano del municipio, razón por la cual es posible que las aguas del río cuenten con la presencia de mercurio.

En el presente trabajo se pretendió hallar si dentro del río Lenguazaque, en las muestras de agua, hay presencia de mercurio como consecuencia de las actividades antropogénicas de extracción y coquizado de carbón en el municipio.

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar de manera multiestacional la contaminación por mercurio en agua extraída del río Lenguaque, Cundinamarca.

4.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Determinar si existe presencia de mercurio en el agua del río Lenguaque.
- Analizar si existen variaciones en la concentración de mercurio en el agua del río para las distintas estaciones y fechas de muestreo seleccionadas.
- Identificar las posibles causas y fuentes de variación en la concentración de mercurio en el agua del río Lenguaque.

5. ANTECEDENTES

El mercurio es ampliamente estudiado por ser dañino para salud humana y para el entorno, el mercurio es un metal pesado, considerado como una sustancia ubicua y de fácil dispersión en el ambiente. En su forma elemental Hg^0 el mercurio puede quedarse residente en el medio en tiempos de hasta un año, mientras que en su forma iónica Hg^{2+} puede tener un tiempo de vida que se da en horas y meses, antes de pasar como depósito en sedimentos o aguas (Gaona Martínez, 2004), el lugar donde se asienta este metal se une al ciclo del agua durante su recorrido, llegando a sistemas de agua lentos y loticos, propendiendo a acumularse en sedimentos, donde pasa a su forma metilada por acción microbiana (Weinberg & IPEN, 2010). Se han hallado diferentes casos por contaminación de mercurio, los cuales han dado alerta ante este elemento, ya que el mercurio afecta la salud humana, ingresando fácilmente el cuerpo, atacando al sistema nervioso, digestivo, cardiovascular e inmunológico siendo el cerebro, pulmones y los riñones los órganos más afectados (OMS, 2016), cuando este elemento se encuentra en su forma elemental dentro de un individuo puede ser absorbido alrededor de un 15%, mientras que en la forma de metilmercurio, para el cuerpo su absorción esta sobre el 90% (Gaona Martínez, 2004).

5.2 CASOS DE CONTAMINACIÓN

Los casos de contaminación por mercurio en sus formas inorgánicas Hg^+ y Hg^{2+} , y sus formas orgánicas metilmercurio (MeHg) y Dimetilmercurio (MeHgMe), han sido

estudiados a causa de la toxicidad y afectaciones a la salud que ocasionan estas sustancias, las cuales en el caso de los seres humanos, están asociadas principalmente a deficiencias en el sistema inmunológico, nervioso y digestivo (AOAC, 2007). Entre los casos de afectaciones por contaminación con mercurio, de mayor importancia a nivel mundial, se encuentra el desastre en Minamata, Japón, el cual alertó sobre los primeros síntomas y consecuencias por la ingesta de mercurio en la comida de mar, como peces y moluscos, principal fuente de consumo de las poblaciones asentadas en este lugar (Gochfeld, 2003). Posteriormente, se realizaron estudios acerca del envenenamiento de miles de personas en esta zona, cuyos resultados dieron fe de alto contenido de metilmercurio, en adultos, los cuales presentaron desórdenes neurológicos. Por otra parte, los estudios realizados, en los nacidos luego del incidente, presentaron parálisis, ceguera y retardo mental (Gochfeld, 2003).

En América, también se han presentado casos, por este tipo de contaminación, uno de ellos en Perú, debido al derrame de mercurio propiedad de la empresa, la Minera Yanacocha, el incidente ocurrió por el inadecuado transporte del material, causando la liberación de mercurio sobre la carretera de Choropampa, posteriormente se presentaron varios diagnósticos médicos sobre quienes habían estado en contacto con el material (CAO, 2000). En este mismo país, en la región de Madre de Dios, consecutivamente se han encontrado altos niveles de mercurio, presentes en cuerpos de agua e ictiofauna, lo cual se asocia con las actividades extractivas de oro realizadas en esta zona (El Nacional, 2016).

En Colombia, se han presentado casos como el acontecido en la quebrada La Cianurada, en el municipio de Segovia, Antioquia, esta quebrada ha tomado este nombre debido a la cantidad de mercurio que queda remanente dado a las actividades extractivas ilegales de oro que allí se realizan, puesto que todavía se utilizan técnicas rudimentarias, y abundan las actividades extractivas ilegales las cuales no tienen control ambiental de las consecuencias ocasionadas (Redacción Vivir, 2013). Dichos casos han alertado la presencia de mercurio, además de los diferentes síntomas en la salud que están asociados a la exposición por mercurio, los cuales se vuelven comunes dentro de las comunidades, como dolores de cabeza entre los más comunes (Patiño, 2014) en zonas donde se realiza la minería ilegal. Otro de los casos conocidos en el país, se encuentra en los complejos ribereños del Magdalena, desde varios años se han desarrollado estudios los cuales validan la presencia de mercurio en los peces, y este tipo de fauna resalta por ser un bioindicador de contaminación del metal por la acumulación dentro de su organismo (Ruiz Chaves, 2016), en el río Magdalena desembocan las aguas de diferentes ríos provenientes del interior del país, que vienen cargadas de todo tipo de contaminantes, entre ellas el mercurio que llegan a las aguas como resultado de minería artesanal e ilegal (Ramírez Baquero, 2018).

5.3 MERCURIO EN CARBÓN

En China, se han reportado múltiples casos de envenenamiento por mercurio en zonas costeras, en todos ellos se observaron altas concentraciones de mercurio especialmente por la realización de extracción aurífera, por otra parte, se sabe que

el mercurio se dispersa en la atmosfera y posteriormente se deposita en suelo y agua, donde se biomagnifica y se introduce en la cadena alimenticia (Manahan, 2003). China es uno de los países que más ha estudiado los casos de mercurio en carbón, principalmente estudios de mercurio que se encuentran son relacionados al desprendimiento de este en la combustión de carbón, al que es generado durante el proceso de extracción de carbón en minas y en procesos de grandes plantas de energía impulsadas por carbón, también se han hecho estudios sobre las zonas rurales, los cuales dependen del uso de carbón para el desarrollo de las actividades, los cuales muestran que en procesos de pequeña escala, también se han encontrado valores de mercurio las cuales provienen en un 50% de las emisiones atmosféricas de la quema del carbón (Wang & Luo, 2017), por lo cual estos estudios señalan la importancia de la atención que se debe manejar por salud pública y científica, ya que el mercurio es un elemento tóxico, no es biodegradable, y además es un metal persistente en la naturaleza, incluso entrando en la cadena alimenticia (Gao, Han, Hao, & Zhou, 2016).

Otras referencias señalan la existencia de mercurio en los diferentes tipos de carbón extraídos, como es el caso de Polonia, en dicha revisión se encuentra que la concentración de mercurio en carbón bituminoso esta entre el rango de 41 y 339 ppb, y asociado a los residuos de minería de estas zonas las concentraciones son aproximadamente entre 55 y 380 ppb (Antoszczyszyn & Michalska, 2017). Existen convenios entre Canadá, Estados Unidos y México, en los cuales se plantea realizar el manejo conjunto del mercurio, para la protección del ambiente, hecho que se debe a los estudios que han evidenciado cifras de 87% del mercurio liberado al

ambiente es debido a procesos de combustión (Mugica et al, 2002). La generación de calor y combustión de carbón son dos las principales actividades humanas, que dan lugar a la presencia de partículas volátiles de mercurio con alta solubilidad en agua, incluso las partículas de mercurio son persistentes en el ambiente hasta periodos de hasta dos años (Zhao et al, 2017).

Diferentes países latinoamericanos han estudiado la problemática asociada a la contaminación por mercurio, casos como Chocó en Colombia, Querétaro en México, en el arco minero del Orinoco en Venezuela, en la amazonia en Bolivia, y en Huancavelica en Perú (Mongabay Latam, 2018), como algunos de los ejemplos más alarmantes, sin embargo la mayoría de la literatura todavía atribuye la contaminación de mercurio a todo tipo de actividad de minería de oro, pese al conocimiento de la presencia del mercurio en el carbón, y en las labores de extracción, refinado de carbón no se poseen sistemas de control adecuados, arrojando al ambiente el metal elemental y cantidades de este adheridas a partículas (Sosa Echeverria, et al 2016).

5.4 MINERÍA DE CARBÓN EN CUNDINAMARCA

La información que se tiene en el país sobre la presión de la carga contaminante en el recurso hídrico, principalmente proviene de los sectores de agricultura y minería, en las que se asocia dentro de las variables del cálculo del ICA, nutrientes solubles, nitrógeno total y fósforo total, también de determinación de metales biodisponibles en los sedimentos, dentro de estos parámetros el 9,7% se asocia a la presencia de

mercurio, parámetro el cual ha empezado a recibir mayor atención, dado que representa un riesgo considerable para la salud humana (Orjuela et al, 2010). Otros datos obtenidos en la elaboración de este estudio en relación a los metales pesados, señalan que la fracción de mercurio en sedimento es de mayor biodisponibilidad, por lo anterior, en el muestreo realizado se evaluaron 128 muestras para análisis de disponibilidad de metales en sedimentos en 68 estaciones, encontrándose un muestreo especial para la presencia de mercurio, por su alta toxicidad y riesgo acumulativo, con 53 muestreos en 311 estaciones, con valores obtenidos de mercurio, los que se describieron como factor de alarma con presencia mayores que 0,17 mg/kg (Orjuela et al, 2010).

En el departamento de Cundinamarca, existen municipios que se dedican a actividades de explotación minera, siendo significativa la explotación de carbón, para usos energéticos y siderúrgicos, por las reservas geológicas condescendientes a las actividades metalúrgicas que se encuentran al interior del país (UPME, 2012). En esta área se encuentran los yacimientos de carbón, conocido como la Formación de Guaduas, el carbón extraído de esta formación se caracteriza por su alto contenido de compuestos volátiles, lo que permite su fácil transformación a coque, y se ha demostrado que en el distrito minero Zipa- Samacá, donde se encuentra la formación, y se en este lugar hay evidencias de las descargas de aguas con concentraciones elevadas, sobre pasando los niveles permisibles de mercurio que se encuentran en la Resolución 631 del 2015 (UPME, 2015).

Cerca al municipio de Lenguazaque, se encuentra el municipio de Guachetá, donde se desarrolla la minería entre las principales actividades productivas del municipio, y en este estudio se tienen pruebas de los problemas ambientales asociados a metales pesados, los cuales se encuentran depositados en fuentes hídricas, suelos y tejidos vegetales (Mahecha, et al , 2016). Durante las distintas etapas que conforman la minería de carbón se pueden enunciar el proceso de explotación, coquizado y transporte, a través de estas etapas especialmente de la coquización se realiza la liberación de los metales contenidos en el carbón (UPME, 2014). Lo anterior sumado a las condiciones climáticas, pueden dar como resultado impactos negativos al ambiente, y a los seres vivos; la problemática presentada anteriormente debe ser considerada con especial importancia por la degradación de ecosistemas de páramo y vegetación de bosque alto andino por las explotaciones en estas zonas (Alfaro Herrera , 2011).

Las actividades mineras en Lenguazaque, se extienden en la parte baja del Páramo, por donde descienden sistemas hídricos que tienen repercusión en el componente biótico de la zona, causando transformación en el medio y desaparición de especies (Corpochivor, 2008). Los impactos sobre el agua se generan por explotación, y actividades correspondientes al uso del carbón, en la cuenca del Río Lenguazaque y sus alrededores, la mala calidad del agua se deba a la disposición de aguas residuales domésticas, partículas en suspensión, e inadecuada disposición de los estériles desechados por las minas y hornos de coque (Corpochivor, 2008). A pesar de ello, no suele tenerse en cuenta los usos del río, siendo esta fuente de abastecimiento para riego y ganado; en el caso de las vacas y ovejas, el mercurio

tiende a metilarse dentro del sistema digestivo de estos, por acción de los microbiomas que se encuentran dentro del tracto (Rodríguez Martín-Doimeadios, et al, 2017), los cuales pueden ser indicador de la acumulación de mercurio, esta información se puede encontrar en mediciones que pueden ser llevadas a cabo en tejidos, hígado y riñones de los animales (Hashemi, 2018), para de esta manera monitorear el contenido y acumulación del mercurio, el cual puede ser una alerta de consumo humano.

En un Informe presentado por UNEP Mercury Assessment, estima que esta fuente es la segunda de mayor impacto y contribución de mercurio en la atmósfera, con un 24% (Mashyanov, et al 2017). El municipio de Lenguazaque, es un lugar en donde se ha extraído carbón durante décadas, además de ello, en este sitio se encuentra el río Lenguazaque (Union Temporal Audicom Ambiotec, 2006), cuerpo de agua del cual se toma el recurso para actividades como riego de cultivos, actividades ganaderas y minería, incluso es desagüe de fuentes domésticas e industriales (Union Temporal Audicom Ambiotec, 2006), además de servir directamente para actividades de comunidades rurales que se encuentran a lo largo de su paso.

6. MARCO REFERENCIAL

6.2 MARCO TEÓRICO

El poco conocimiento de la presencia de mercurio en el carbón hace que no se tomen medidas adecuadas o estrategias para la mejora de los riesgos latentes del elemento en los ambientes que puedan afectar a los seres vivos, sin embargo, para el caso de Colombia, se tiene conocimiento de algunos casos como el que es enunciado por la UPME, evidenciando la problemática de mercurio enmarcadas en las actividades extractivas, de especial enfoque en el carbón y sus usos en la industria.

La capacidad del mercurio de estar presente en el agua, se debe al efecto de fijación de vapores atmosféricos desprendidos de procesos de combustión de carbón en las aguas pluviales. Sin embargo, en el caso presente se señala que este elemento se encuentra introducido por los residuos industriales por procesos de extracción de carbón, y de coquizado. Una de las formas en las cuales el mercurio puede llegar a contaminar a los seres humanos, es por dispersión en la atmosfera, las cuales tiene diferentes formas de ser absorbida por el cuerpo, por vía digestiva a través de los alimentos que contienen este elemento, también mediante los pulmones por vía respiratoria, esto en su estado metálico, estos pueden absorben entre un 80 a un 90% de la dosis inhalada, mientras que por vía digestiva se absorbe su forma inorgánica con un porcentaje entre el 10 al 20 del ingreso total de la ingesta (Rojas & Carrero, 2009).

Las organizaciones encargadas de los temas de salud, como la Organización Mundial de la Salud, advierten las fuentes naturales y antropogénicas que pueden desencadenar graves problemas a la salud a causa de la contaminación por mercurio, señalando que actualmente los niveles de este elemento en la atmósfera son de 3 a 6 veces superiores de lo que se tenía antes de la época de la industrialización (Poulin & Gibb, 2008), también se encuentra que la exposición para seres humanos es de mayor exposición debido a diferentes trabajos que se desempeñan, y aumenta el riesgo cuando las condiciones de trabajo son precarias, por los efectos no controlados (Poulin & Gibb, 2008).

Varios estándares se tienen sobre las cantidades permisibles en el agua, por presencia de mercurio, los valores internacionales de referencia son de 0,001 mg/L y 0,002 mg/L respectivamente de la OMS y la EPA (MinAmbiente, 2012), siendo en Colombia el valor aceptado también de 0,001 mg/L por la resolución 2115 del 2007.

6.3 MARCO CONCEPTUAL

6.3.1 Minería de Carbón

El carbón ha sido un recurso que a través del tiempo ha adquirido gran participación en la industria, por su uso y aprovechamiento de la energía que desprende en la combustión, además de ser el resultado de la acumulación de materia orgánica de muchos años, esta roca sedimentaria se caracteriza por su alto contenido de carbono, además de ello se enriquece de otros elementos como el azufre, oxígeno

y nitrógeno constituyendo mejores propiedades para el carbón y sus usos (Ayala Carcedo, 1988).

6.3.2 Sedimentos

Los sedimentos son residuos de rocas y plataformas continentales, la importancia de ellos se encuentra en la clasificación de la medida de los granos de los cuales están compuestos, pues de esta medida depende el comportamiento en el medio donde se encuentren (Iriondo, 2007). Los sedimentos son el material arrastrado por los ríos, pueden provenir de desprendimiento de tierras u otros reservorios de agua, durante su recorrido, los sedimentos pueden traer consigo nutrientes y materia orgánica (Elosegi & Sabater, 2009). Estos pueden ser consecuencia de actividades antrópicas como lo son la agricultura y las explotaciones forestales, en las que no solo se promueven los sedimentos, sino también la erosión y compactación del suelo (Camprodon , Ferreira, & Ordeix, 2012). Además, los sedimentos en el agua, puede actuar como material adsorbente de algunos contaminantes, permitiendo su sedimentación en zonas lenticas.

6.3.3 Metales Pesados

Los metales pesados son un tipo de elementos químicos los cuales por sus propiedades se caracterizan por tener una densidad desde los 6 g/cm³ y también por ser elementos potencialmente tóxicos representando un riesgo para el ambiente y para la salud humana, cuando estos se utilizan en dosis altas (Bautista Zuñiga ,

1999). De forma condensada, estos elementos no son peligrosos, cuando estos elementos pierden electrones entran a un estado de oxidación positivo, y pueden reaccionar con mayor facilidad con los diferentes compuestos del lugar donde se encuentran, y formar unidades adversas al medio (Baird, 2004).

6.3.4 Mercurio (Hg)

El mercurio se caracteriza por ser un metal único, debido a que se encuentra en estado líquido a temperatura ambiente, conocido como plata líquida o hidrargiro. En su forma más elemental Hg^0 , es volátil y en condiciones ambiente, puede pasar a su fase de vapor, además su solubilidad en el agua de 0,08 mg/L (Gochfeld, 2003). Se encuentra de forma natural en la corteza terrestre, siendo su concentración cerca de 80 $\mu\text{g/kg}$, debido a procesos naturales ligados de la actividad volcánica, movimiento de cuerpos de agua y procesos naturales. Después de la revolución industrial los niveles de mercurio en el ambiente comenzaron a ascender y desde entonces las actividades antropogénicas han sido contribuyentes a la distribución del mercurio y sus diferentes formas (OMS, 2003).

Entre las actividades en las cuales se hace uso del mercurio se pueden mencionar procesos extracción aurífera, procesos industriales como el proceso Cloro-Alcali, uso de combustibles fósiles, siendo de especial interés el carbón, e incineración de desechos (OMS, 2003). Al aumentar la concentración de mercurio en el ambiente, por acciones antrópicas, se da lugar a un proceso cíclico, en el cual el mercurio pasa por la atmósfera, agua y suelo. Es común encontrarlo en su forma inorgánica

(Hg^+ y Hg^{2+}) en ambientes oxidantes (Gochfeld, 2003). Uno de los grandes problemas generados por la presencia del mercurio en el recurso hídrico, es la biomagnificación del metal en la cadena alimenticia, los metales como el mercurio se acumulan en la micro biota y posteriormente pasan a las demás especies animales, llegando finalmente a los humanos (Rahman & Singh, 2016).

6.3.5 Metilmercurio

Es su forma metilada el mercurio, o también conocido como metilmercurio, causa afectaciones al sistema nervioso, llegando a causar muerte celular. El metilmercurio se forma principalmente por la acción de microorganismos acuáticos, cuando se encuentra en cuerpos hídricos, donde el mayor problema que crea es la acumulación otros seres vivos, principalmente en peces (OMS, 2008). Los animales acuáticos de aguas dulces y salubres, son la principal fuente de ingesta de mercurio y metilmercurio, en los boletines de la organización mundial de la salud se señala que el consumo de pescado y mariscos provocan un riesgo neurotóxico, los cuales se acumulan en el cabello y sangre de diferentes poblaciones que se alimentan de este tipo de alimentos a nivel global (OMS, 2008). El metilmercurio no es una forma fácilmente definida, por lo que se desconoce cómo se desenvuelve su toxicidad en los organismos, tiende a estar presente en suelos y sedimentos, donde también se generan procesos de bioacumulación (Cuello Nuñez, 2016).

6.4 MARCO GEOGRÁFICO

El municipio de Lenguaque (gráfica 1) se encuentra ubicado al norte del departamento de Cundinamarca, el cual tiene límites de los municipios de Villapinzón, Ventaquemada, Guachetá, Suesca, Ubaté y Cucunubá, y también limita con el departamento de Boyacá, Lenguaque tiene una altitud de 2589 msnm, caracterizado por un clima frío con temperaturas entre los 12° a 14° C (Charry Otálora & Riaño Cantor , 2015).

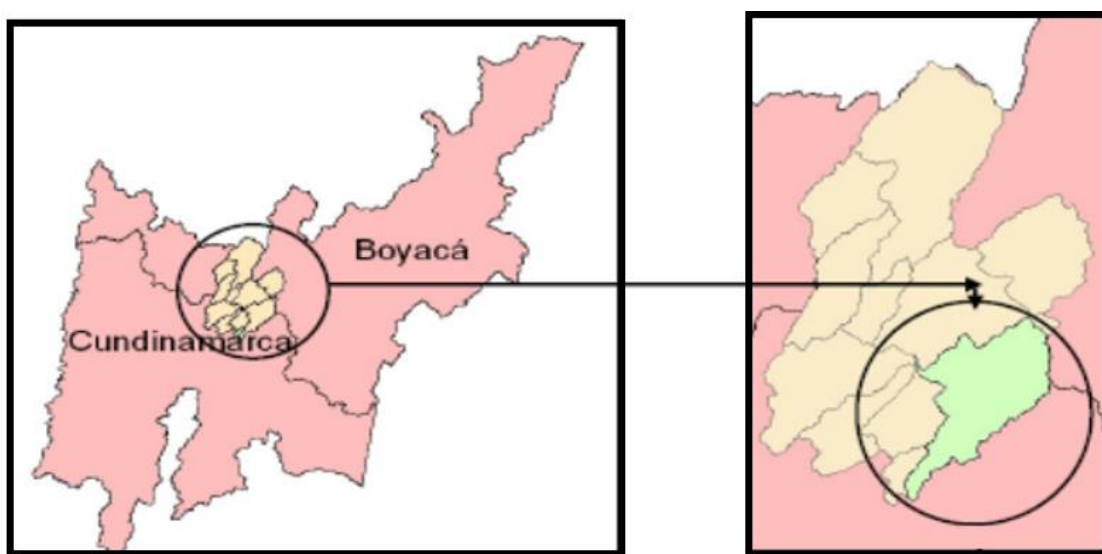


Gráfico 1 Modificado de Perfil Ambiental de la Sub-Cuenca del Rio Lenguaque (Charry & Riaño, 2015)

El área de influencia, lugar donde se desarrolla el presente proyecto, está ubicado en el municipio de Lenguaque, perteneciente a la cuenca hidrográfica de los ríos Ubaté y Suárez, enfocado en la subcuenca del río Lenguaque, la cual se encuentra conformada por los municipios de Cucunubá, Guachetá, Lenguaque y Suesca, con una extensión de 28,862 ha, la mayor parte de la subcuenca, con un 52%, se encuentra ubicada en el municipio de Lenguaque, esta cuenca es de

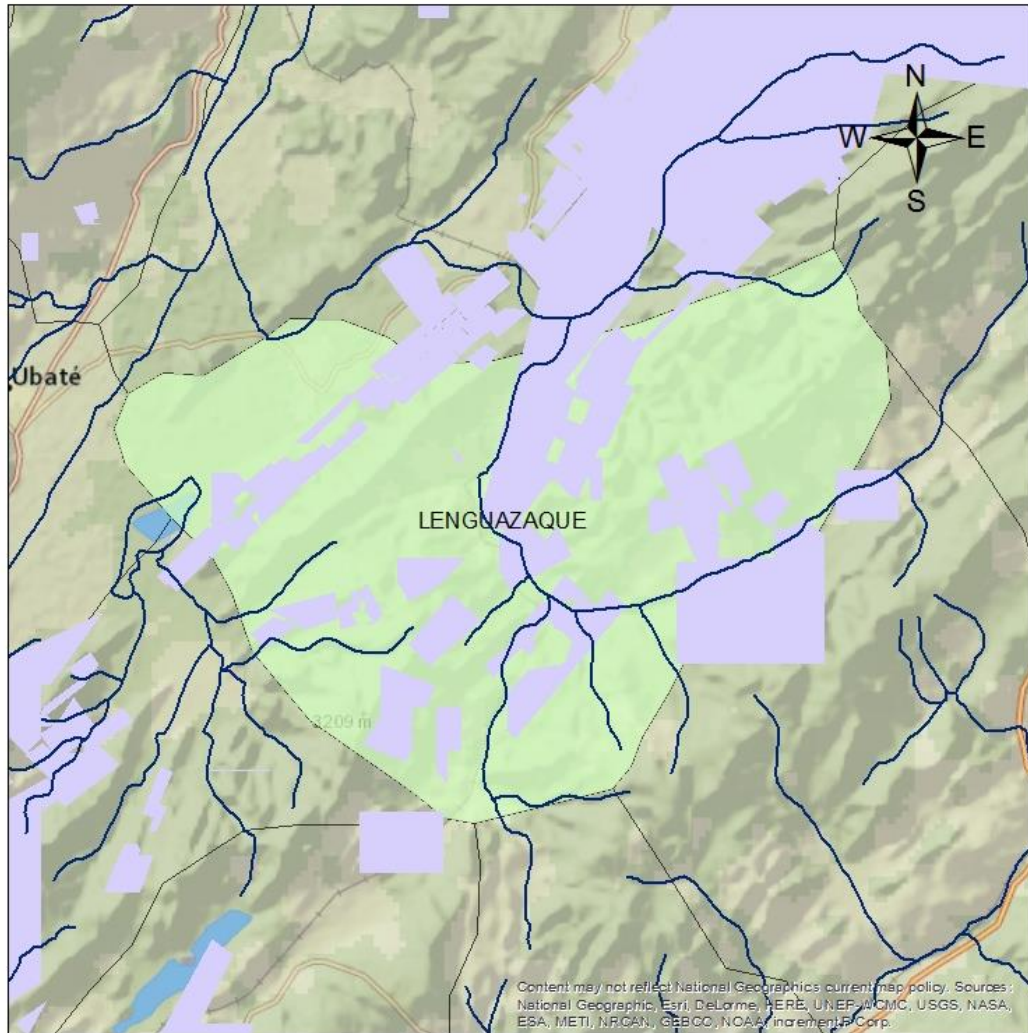
tercer orden, con una longitud de su cauce principal de 42,5 km, y su forma es rectangular oblonga (Charry Otálora & Riaño Cantor , 2015), el cauce de este río tiene su origen en la Quebrada Ovejeras y se une en la vereda Punta Grande con el río Ubaté (CAR, 2006).

Lenguazaque las condiciones donde se encuentra el municipio, determina las zonas climáticas templadas y frías, y precipitaciones bimodales, contando con temporadas de lluvia en los meses desde Marzo a Mayo y Octubre a Noviembre, donde se evidencian alrededor de la mitad de las precipitaciones anuales, y temporadas secas en los meses de Diciembre a Febrero y luego de Junio a Septiembre (SGC, 2012) además de ello, las distribuciones de los caudales para este municipio presentan registros máximos para el mes de mayo con un valor de 2,65 m³/s, y valores mínimos para el mes de febrero con un histórico de 0,56 m³/s (Charry Otálora & Riaño Cantor , 2015).

Esta zona se encuentra caracterizada por encontrarse dentro de una cadena montañosa, condiciones frías, aunque en esta zona se tiene un potencial agrícola limitado y baja fertilidad, la economía de este municipio también se basa en cultivos de papa y arveja, por ello el uso que se le da en esta zona a los suelos, en su mayoría es para la ganadería extensiva (Charry Otálora & Riaño Cantor , 2015). Otra de las afectaciones que influyen de manera negativa sobre el municipio, y sus alrededores son las actividades de la minería de carbón, que también afectan la calidad de los vertimientos, generando la degradación no solo de los suelos, sino además de especies nativas de fauna, como lo son reptiles, anfibios y peces, los

cuales se ven afectados directamente por la falta de tratamiento previo, por ello esta cuenca se encuentra como un caso de priorización para la optimización de sistemas de tratamiento de aguas residuales, ya que afectan otros cuerpos de agua por el aporte contaminante que este lleva (Gobernación de Boyacá, 2014).

Lenguazaque, cuenta con un porcentaje de área de 2059 ha del macizo el Rabanal, ecosistema vulnerable, donde se realiza extracción y procesamiento de coque, este lugar se caracteriza por la geología de donde se desprenden las actividades de carbón por el potencial geológico que se encuentra en el rabanal, generando de esta manera un conflicto por la demanda del recurso hídrico, de las diferentes actividades que se desarrollan en la zona, problemas ambientales como lo son la contaminación atmosférica, y afectación por la deposición de los materiales que se desprender sobre las aguas superficiales, y por las que llegan también hasta la aguas subterráneas (Humboldt, 2013). En esta zona, se encuentra gran cantidad de minería, como se muestra en el gráfico 2, la cual se extiende hacia el municipio de Guachetá, en el informe de producción de carbón realizado por la UPME, para el año 2014, se encuentra que los municipios de mayor participación en esta actividad son Guachetá con 28,95%, Cucunubá con 26, 62% y Lenguazaque con 14,95% (UPME, 2014).



CONVENCIONES

- Ríos
- Minería
- Lenguaque
- División Municipios
- NatGeo_World_Map

Minería Municipio de Lenguaque

0 0,5 1 2 3 4 Miles

1:125.000

Sistema de coordenadas: WGS 84
Datum: World Geodetic System 1984
Unidades: degree

Gráfico 2 Minería municipio de Lenguaque. Autor, 2017

6.5 MARCO LEGAL

Dentro del goce de los derechos involucrados en la constitución política de Colombia, se destaca el acceso al recurso hídrico, protección de áreas de especial importancia ecológica y ecosistemas fronterizos, y en general el derecho de un ambiente sano. El manejo del mercurio, por sus propiedades y consecuencias en la salud humana e implicaciones en el medio, ha dado lugar a la creación de normatividad reguladora del uso y disposición de este metal, normatividad que va desde el manejo del mercurio, actividades mineras que favorezcan los recursos y la disposición de desechos.

El sector minero, ha tenido grandes transformaciones, siendo de importancia las asociadas a las pequeñas y medianas empresas de minería, debido a las distintas problemáticas que se despliegan por el establecimiento de la minería, en relación con la distribución de los recursos naturales. De acuerdo al UPME, en Colombia, es evidente la presencia de este mercurio en el ambiente, y se encuentran diferentes normas asociadas a este, tal y como se señala en la tabla 1, situación ocasionada por la expansión de la explotación de carbón, oro y níquel en un contexto nacional e internacional, a lo cual dicha expansión genera retos para la autoridad ambiental (UPME, 2014).

Tabla 1 Marco Normativo sobre Hg

NORMATIVIDAD	DESCRIPCIÓN	OBJETO
MERCURIO		
LEY 1658 DE 2013	Uso de mercurio en las actividades	Disposiciones para la comercialización y el uso de mercurio, requisitos e incentivos para la reducción, eliminación y otras órdenes, para la protección de la salud humana y recursos naturales renovables y el ambiente
RESOLUCIÓN 2189 DE 1974	Uso agrícola de fungicidas de compuestos de Mercurio	Cancelación de los registros e productos agrícolas de compuestos a base de mercurio
RESOLUCIÓN 565 DE 2016	Requisitos y procedimiento para el Registro de Usuarios de Mercurio - RUM para el sector minero	Reglamenta de manera gradual el establecimiento, requisitos y procedimientos para el RUM, instrumentos de captura y gestión de la información sobre el uso del mercurio.
MINERIA		
LEY 685 DE 2001	Código de Minas	Fomentar la exploración técnica y explotación de los recursos mineros de propiedad estatal y privada; Estimular las actividades para la satisfacción de las necesidades y que su aprovechamiento se realizada de forma armónica con los recursos naturales no renovables y del ambiente.
GENERALES		

NORMATIVIDAD	DESCRIPCIÓN	OBJETO
LEY 9 DE 1979	Medidas sanitarias	Protección del medio ambiente, y disposiciones necesarias para preservar, restaurar y mejorar condiciones sanitarias que pongan en riesgo la salud humana, y medidas de control para descarga de residuos y materiales que afecten condiciones del ambiente
DECRETO 4741 DE 2005	Prevención y manejo de los residuos peligrosos	Prevención de la generación de residuos o desechos peligrosos, cuyo fin es la protección de la salud humana y del ambiente.
DECRETO 3930 DE 2010	Usos del agua y residuos líquidos y disposiciones adicionales	Usos del recurso hídrico, ordenamiento y vertimientos en agua, suelo y alcantarillados
DECRETO 4728 DE 2010	Modificación parcial del <i>Decreto 3930 de 2010</i>	Modifica Art 28: Fijación del vertimiento y normas sobre este. Art 34. Protocolo de Monitoreo de vertimientos de aguas superficiales y Subterráneas. Art 35 Planes de contingencia para el manejo de Hidrocarburos y sustancias nocivas. Art 52
DECRETO 1076 DE 2015	Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible	Compilado de la normatividad en el sector Ambiente

NORMATIVIDAD	DESCRIPCIÓN	OBJETO
RESOLUCIÓN 1362 DE 2007	Registro de generadores de Residuos o Desechos Peligrosos	Establecer los requisitos y procedimientos necesarios para el Registro de Generadores de Residuos o Desechos Peligrosos, e información asociada a los residuos.
RESOLUCIÓN 2115 DE 2007	Características, instrumentos y frecuencias de sistema de control y vigilancia para la calidad de agua de consumo humano	Valores máximos permisibles de sustancias físicas y químicas y aplicación de un sistema de vigilancia para el control y verificación de parámetros
RESOLUCIÓN 631 DE 2015	parámetros de vertimiento de aguas residuales tratadas de acuerdo al sector industrial o domestico	Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.

7. MARCO METODOLÓGICO

El proyecto consistió en la realización de tomas de muestras de agua para el respectivo análisis de mercurio en cinco (5) puntos ubicados a lo largo de un tramo del río Lenguaque caracterizado por la cercanía a hornos de coquizado, a fin de determinar si las emisiones atmosféricas realizadas por los hornos dan lugar a la presencia de mercurio en el agua del río. Los puntos de muestreo fueron seleccionados teniendo en cuenta que el tramo del río donde se ubicó cada punto fuese recto, ausente de estructuras que afectaran la dinámica del agua del río, de fácil acceso para la toma de muestra y en especial, que el río no recibiera tributario alguno que alterara la calidad de sus aguas en el tramo seleccionado (IDEAM, 2007).

El primero de los puntos fue ubicado aguas arriba de la zona de influencia de los hornos de coquizado existentes en el área rural del municipio de Lenguaque, es decir un posible punto de contaminación baja o nula, el siguiente punto fue ubicado en cercanías a la zona donde se encuentran los hornos de coquizado, dos puntos más fueron tomados, procurando que estuviera ubicados en cercanías al área de la cual está ubicada la mayoría de los hornos. El último punto fue ubicado una vez el cauce del río se aleja de las inmediaciones de los hornos.

Cada una de las muestras fue tomada en el centro del río haciendo uso de recipientes de plástico con capacidad de 1 L; En el caso de ríos de poca profundidad (como es el caso del río Lenguaque en el tramo analizado, para el cual la

profundidad promedio para los puntos de muestreo fue de 0.5 m) está permitido que las muestras sean tomadas sin ningún equipo adicional, sumergiendo la boquilla del recipiente en el agua (IDEAM, 2007), en las jornadas de toma de muestras realizadas en el proyecto, el recipiente fue sumergido aproximadamente 0.15 m en el agua para evitar contaminación de la muestra por efecto del aire circundante, el cual está bajo la influencia de las emisiones de los hornos de coquizado. Una vez tomadas las muestras, se realizó el transporte de estas al laboratorio de la Universidad Libre, la preservación fue realizada haciendo uso de neveras de icopor con el objeto de conservar la temperatura alrededor de los 5 °C y adicionando HNO_3 (Grupo Salud Ambiental, 2011). Las muestras fueron tomadas 1 vez al mes, durante 4 meses, es decir, en total se tomaron 20 muestras, entre los meses de febrero y mayo de 2018. Las muestras fueron analizadas por triplicado de manera que pudiera ser calculado el valor medio y porcentaje de error de cada medición.

La determinación de la concentración de mercurio en las muestras tomadas e campo fue hecha por Espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA), técnica que ha sido desarrollada, para la determinación y cuantificación de metales pesados, usando la lámpara de cátodo hueco de Hg, este equipo permite la transición de la muestra líquida al estado de vapor que se somete a la acción de una llama de aire/acetileno dentro de una celda que se encuentra situada bajo la fuente de luz del espectrofotómetro (EPA, 1994). El análisis de las muestras fue realizado por la técnica de espectrofotometría de absorción atómica en llama directa, dada la disponibilidad del equipo en los laboratorios de la Universidad Libre- Sede Bogotá, el espectrofotómetro de absorción atómica empleado es de la marca Perkin Elmer,

modelo AA300. La técnica de análisis fue llevada a cabo de acuerdo con las especificaciones del “Analytical Methods for Atomic Absorption Spectroscopy”, el cual presenta el protocolo para el análisis de mercurio; La concentración característica del método es de 200 mg/L, el rango de linealidad alcanza los 300 mg/L de mercurio y la concentración mínima detectable es de 4 mg/L, de acuerdo a esto, los patrones de calibración fueron preparados dentro de este rango, haciendo uso de HgO como sustancia patrón.

Tras la elección del método de determinación del mercurio, se procedió a la realización estándar analítico de Hg, con una concentración de 1000 mg/L, y soluciones patrones de 10 mg/L, 50 mg/L, 200 mg/L y 300 mg/L para la curva de calibración.

A continuación, en la gráfica 3, el procedimiento de preparación de la solución estándar, basado en la metodología “Analytical Methods for Atomic Absorption Spectroscopy” del equipo Perkin Elmer AAnalyst 300.

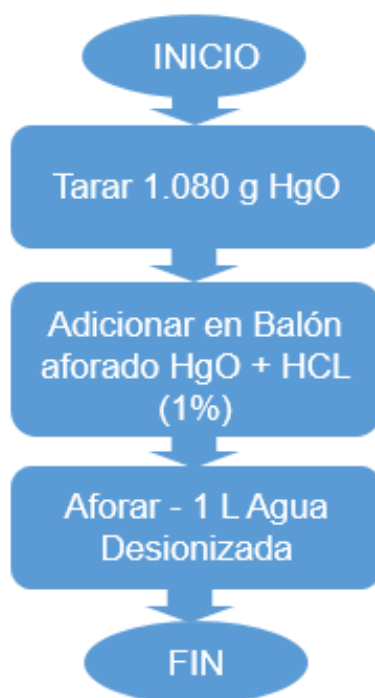


Gráfico 3 Procedimiento de preparación de estándar para Hg.

En la tabla 2, se encuentra la preparación de los estándares de calibración realizados bajos las condiciones del Espectrómetro de Absorción atómica, teniendo en cuenta que dentro de los estándares seleccionados para la curva de calibración se incluyó la concentración característica de verificación (Characteristic Concentration Check), con valor de 200 mg/L. Los valores de las concentraciones que fueron elegidos, fueron realizados con las observaciones de los análisis de métodos para el equipo, ya que hasta los 300 mg/L, la curva de calibración mantiene la tendencia lineal que permite la lectura de los datos.

Tabla 2 Estándares para la curva de calibración de Hg

IDENTIFICACIÓN ESTÁNDAR	Hg (mg/L)
BLANCO	0
SLN 1	10
SLN 2	50
SLN 3	100
SLN 4	200
SLN 5	300

Los resultados obtenidos a partir de los estándares utilizados se encuentran en la tabla 3, los cuales corresponden a la gráfica 4, con los cuales se obtuvo la determinación de la ecuación $y = 0.001 * x + 0.0056$ con un coeficiente de correlación de (R^2) igual a 0,9998. La absorbancia de cada una de las soluciones patrón, fue medida tres veces, cada vez que fueron realizados análisis de muestras del agua del río Lenguazaque.

Tabla 3 Concentraciones para la curva de calibración para el análisis de Hg.

PATRON		
#	[mg/L]	Abs
0	0	0
1	10	0,011
2	50	0,046
3	100	0,108
4	200	0,222
5	300	0,340

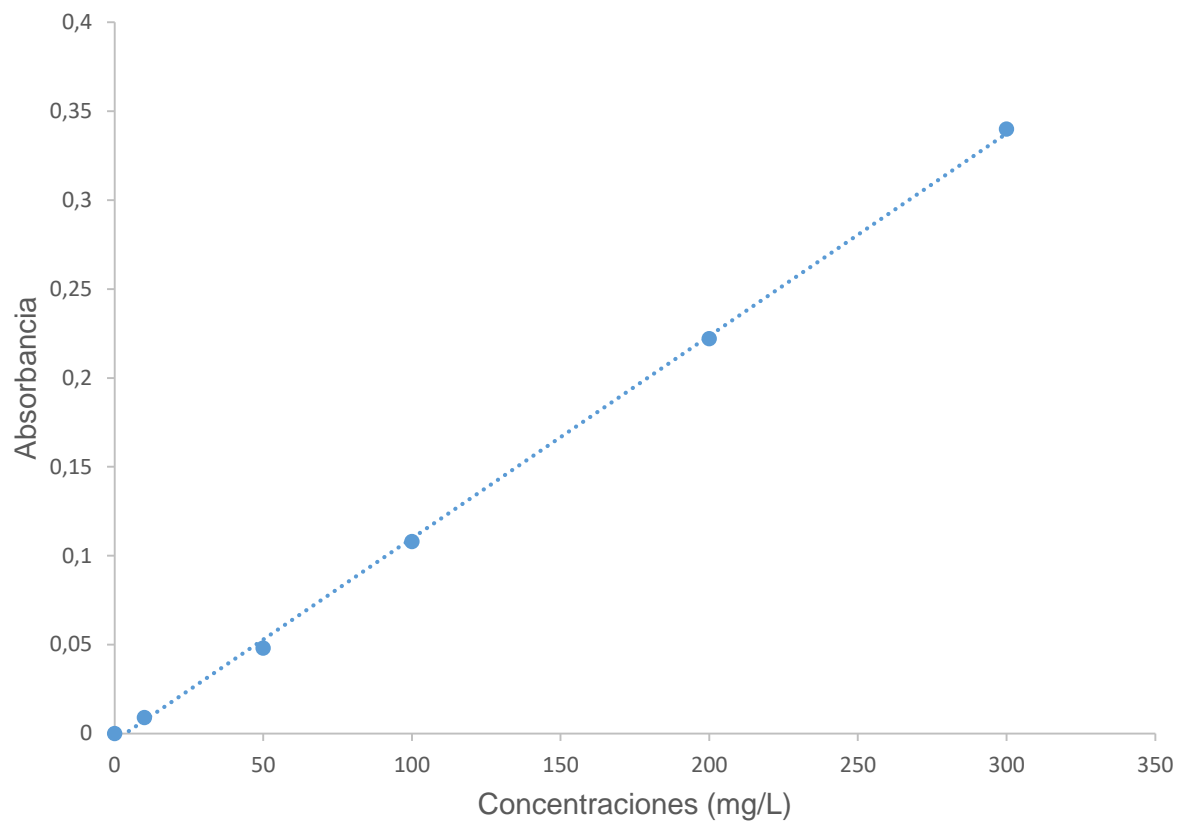


Gráfico 4 Curva de calibración de Concentraciones de Hg vs Absorbancia.

Para la preparación de las muestras extraídas del río Lenguazaque, se hizo la digestión de la muestra, de la siguiente manera en el gráfico 5.

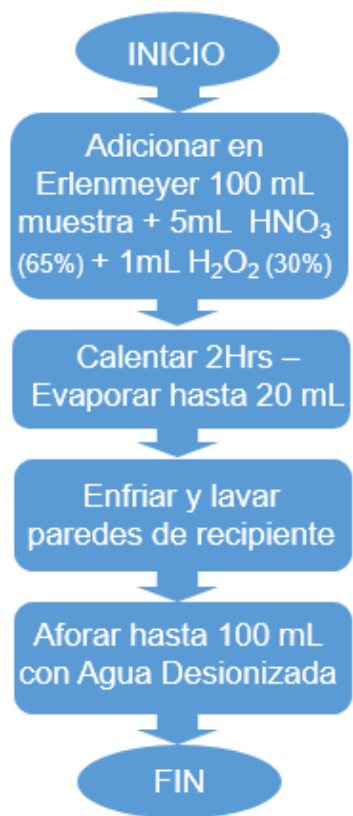


Gráfico 5 Procedimiento de digestión de la muestra para determinación de Hg.

Luego de determinada la curva de calibración, se procedió a la medición de las muestras para encontrar el contenido de mercurio dentro de ellas, el equipo realizaba un ponderado automatico de la lectura de tres veces el valor de la muestra, adicional a esto se hizo el análisis de cada muestra tres veces. En cada una de las sesiones, se hacia una verificación general al equipo, teniendo en cuenta el flujo de aire –acetileno, la calidad de la llama (color azul), la dirección de haz de luz sobre la llama, que llevaba hasta la lámpara de mercurio, y la calidad de absorción de la muestra.

8. MUESTREO Y ANÁLISIS

El municipio de Lenguaque, es un municipio de pocos habitantes, con cifras de población total de 10,268, y población urbana de 2282, cifras obtenidas del estudio del DANE; de acuerdo a la normatividad para agua potable, resolución 2125 de 2007, se establece el procedimiento de vigilancia y control para el agua potable, y entre estos, los acuerdos mínimos para el análisis de características físicas y químicas del agua cruda y potable, en el caso del mercurio, se puede elegir la frecuencia de acuerdo a los requerimientos de la autoridad ambiental y sanitaria competente, por ello y dada la posible presencia de mercurio en el agua y su reconocido efecto adverso en la salud, se eligió realizar los muestreo mensualmente, de manera que se lograra contar con suficientes datos para comparar los valores obtenidos y determinar el posible grado de exposición de los habitantes del municipio, quienes toman el agua cruda para potabilizar y para actividades agrícolas y pecuarias del río Lenguaque, cabe señalar que de conformidad con los criterios de calidad del agua para la destinación o uso del recurso, la máxima concentración de mercurio para el agua de un río destinada para consumo humano es 0,002 mg/L y 0,01 mg/L para uso pecuario (decreto 1594 de 1984).

8.2 MUESTREO EN CAMPO

8.2.1 Reconocimiento del área de trabajo

En enero de 2018, fue realizada la visita de reconocimiento a la zona de estudio, se observaron las actividades realizadas cotidianamente en el municipio y las zonas aledañas a los hornos de coquizado, para este fin fue realizado un recorrido a lo largo de la margen del río que se encuentra en cercanía a los hornos, la ilustración 1, permite observar la humareda emitida por uno de los hornos de coquizado que se encuentra ubicados en las cercanías al río Lenguazaque.



Ilustración 1 Emisiones atmosférica de las actividades de Carbocoque en el municipio de Lenguazaque.

Panoramas como el presentado en la ilustración 1, son recurrentes fuera del área urbana del municipio de Lenguazaque. En el transcurso de la visita, también se determinó la ubicación de los puntos de muestreo.

8.2.2 Establecimiento de los puntos de muestreo

La descripción de los puntos se encuentra a continuación.

- Punto de muestreo #1: Este estaba ubicado fuera del área urbana del municipio, este punto de muestreo se presenta en la ilustración 2, en este punto el agua del río se emplea para consumo humano y riego de cultivos, además es este lugar se observa poca intervención antrópica directa, y los asentamientos rurales se encuentran alejados, en el punto no se observaron vertimientos o conexiones que pudieran alterar el caudal y calidad del agua así como vertimientos puntuales.



Ilustración 2 Lugar de toma de muestra (1er punto de muestreo)

- Punto de muestreo #2: Este punto de muestreo fue seleccionado en el punto donde tienen inicio o se asientan los primeros hornos de coquizado, pertenecientes a la empresa Carbocoque. En este lugar, se aprecia aumento en la vegetación de galería, también es evidente la presencia de árboles foráneos tal como el eucalipto, tal como se puede observar en la ilustración 3.



Ilustración 3 Lugar de toma de muestra (2do punto de muestreo)

- Puntos de muestreo # 3 y # 4: Estos fueron puntos intermedios, ubicados para conocer la variación de las características de las muestras de agua, por efecto de los depósitos de carbón encontrados cerca de la ribera del río (ilustración 4), estos depósitos se encontraban formando pilas dentro de un reservorio de agua de la empresa propietaria del horno, en esta misma imagen se pueden apreciar las emisiones atmosféricas efectuadas o producto de la actividad de coquizado de carbón.



Ilustración 4 Depósitos de los remanentes de las actividades de la empresa Carbocoque

El punto de muestreo número 3, ilustración 5a, se caracterizó por la ausencia de vegetación que cubriera el cauce del río, por otra parte, es necesario anotar que en todas las jornadas de muestreo se encontraron restos de carbón en la orilla del río. El punto de muestreo 4 se presenta en la ilustración 5b, en este punto el cauce del río si presenta vegetación que lo cubre, pero al igual que en el punto de muestreo anterior, en todas las jornadas de muestreo realizadas, se observaron restos de carbón en las orillas del cauce.



Ilustración 5 a) Lugar de toma de muestra (3er punto de muestreo). b) Lugar de toma de muestra (4to punto de muestreo).

- Punto de muestreo #5: Ubicado cerca al área donde finalizan las actividades de coquizado de la empresa más grande de la región. La ilustración 6 presenta el punto de muestreo, en este punto la vegetación es abundante y cubre la mayor parte del cauce del río, no se observó carbón en las orillas, pero se evidenciaron puntos de captación de agua para actividades agrícolas y pecuarias.



Ilustración 6 Lugar de toma de muestra (5to punto de muestreo)

En el gráfico 6, se ubicaron los puntos de muestreos que fueron seleccionados y sus respectivas coordenadas, mismas que son presentadas en la tabla 4, las coordenadas de los puntos fueron establecidas con la aplicación móvil, Locus Map Free, en esta misma tabla, se encuentran las distancias que separan un punto del otro.



Gráfico 6 Puntos de muestreo seleccionados en el Rio Linguazaque. Autor, 2019

Tabla 4 Puntos de muestreo y distancia de los puntos de muestreo.

#	COORDENADAS		TRAMO		DISTANCIA m
	N	W			
1	05°18,229'	73° 42,619'			
2	05°19,021'	73° 42,275'	1	2	900
3	05°19,059'	73° 42,219'	2	3	230
4	05°19,373'	73° 41,996'	3	4	400
5	05°19,204'	73° 42,0,93'	4	5	350

Como fue indicado anteriormente la toma de muestras fue realizada una vez al mes durante cuatro meses consecutivos, con inicio el mes de febrero del año 2018, y finalización el mes de mayo del mismo año, la selección de los meses de inicio y finalización fue hecho con el fin de abarcar meses para los cuales tomara lugar un

cambio en el régimen de precipitaciones y por lo tanto variaciones en el caudal del río.

9. ANALISIS Y RESULTADOS

En la tabla 5, se presentan los resultados del análisis de mercurio realizado a las distintas muestras de agua tomadas en el río Lenguazaque, entre los meses de febrero y mayo de 2018.

Tabla 5 Valores de concentraciones de Hg, error estándar, porcentaje de error, y valores de pH de las muestras de febrero, marzo, abril y mayo

FEBRERO				
Punto de muestreo	CONCENTRACIÓN (mg/L)	ERROR ESTANDAR	% DE ERROR	pH
1	0,161	0,004	2,48	4,99
2	0,242	0,008	3,31	5,30
3	0,400	0,015	3,75	5,70
4	0,122	0,003	2,46	5,52
5	0,564	0,021	3,72	5,48
MARZO				
Punto de muestreo	CONCENTRACIÓN (mg/L)	ERROR ESTANDAR	% DE ERROR	pH
1	0,143	0,007	4,90	5,43
2	0,308	0,015	4,87	4,89
3	0,063	0,003	4,76	4,82
4	0,201	0,009	4,48	4,95
5	0,421	0,011	2,61	5,30
ABRIL				
Punto de muestreo	CONCENTRACIÓN (mg/L)	ERROR ESTANDAR	% DE ERROR	pH
1	0,288	0,005	1,74	5,63
2	0,663	0,015	2,26	4,98
3	0,302	0,003	0,99	5,22
4	0,565	0,021	3,72	5,23
5	0,391	0,016	4,09	5,89
MAYO				
Punto de muestreo	CONCENTRACIÓN (mg/L)	ERROR ESTANDAR	% DE ERROR	pH

1	0,101	0,005	4,95	4,70
2	0,183	0,0011	0,60	5,01
3	0,154	0,007	4,55	4,44
4	0,108	0,003	2,78	4,26
5	0,428	0,021	4,91	4,72

Como se puede apreciar en la tabla 5, se encuentran las concentraciones obtenidas de las muestras de los diferentes meses, como bien se ha señalado, los valores obtenidos se encuentran por debajo del límite de detección del equipo, situación que solo permite señalar que posiblemente el mercurio está presente en las muestras analizadas, pero no permite asegurar que la concentración reportada sea correspondiente al valor real. Se puede apreciar que la concentración de mercurio en las muestras tiende a aumentar a medida que la muestra analizada fue tomada en el área de influencia de los hornos de coquizado. Es preciso indicar que a cada muestra tomada fue separada en alícuotas de igual volumen y cada alícuota fue analizada de estos resultados fue calculado el porcentaje de error en la medición para cada punto.

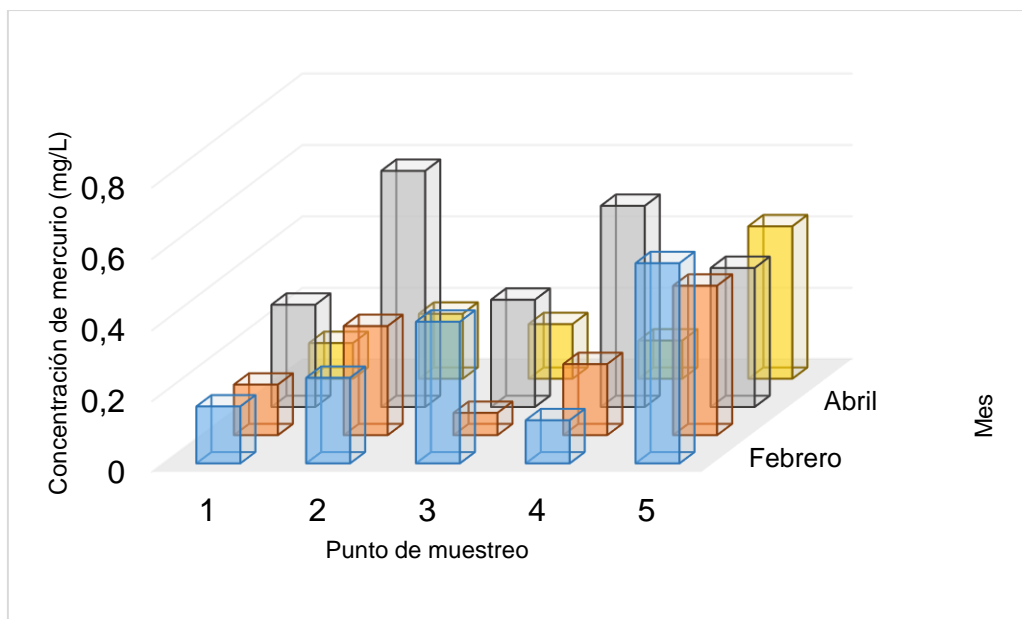


Gráfico 7 Concentraciones de mercurio en las muestras tomadas en el río Lenguazaque

En el gráfico 7, se observa que en los meses de febrero, marzo y mayo, la estación de muestreo que presentó la mayor concentración de mercurio fue la estación número 5, justamente la que está ubicada después de la zona de influencia de los hornos de coquizado, además se aprecia que durante estos meses la concentración presentó una tendencia creciente desde la estación 1 a la estación 5. Con respecto al mes de abril, la tendencia de la concentración fue variable presentándose la mayor concentración en las estaciones de muestreo número 2 y 4.

La tabla 6, contiene los datos correspondientes a precipitación en el área de influencia del proyecto, velocidad del agua y caudal promedio del río Lenguazaque para los meses en los cuales fueron realizados los muestreos, se puede observar que el mes de febrero fue el que presentó menor precipitación y por lo tanto menor caudal, siendo consistente con los resultados de los análisis realizados, dado que

al ser menor la precipitación en la zona, el caudal del río disminuye y así mismo la capacidad de dilución de contaminantes, de ese modo las concentraciones de contaminantes en el agua presentaron mayores valores en febrero. El mes de abril presentó los mayores valores de precipitación y caudal a lo largo del intervalo de tiempo analizado, con lo cual la capacidad de asimilación de contaminantes por dilución en el río Lenguazaque debe aumentar en el periodo, resulta extraño que, contrario a lo esperado en el mes de abril la concentración de mercurio en el agua del río resultó ser mayor que en los demás meses, este hecho sugiere dos posibles situaciones, en primer lugar es factible que en el suelo exista mercurio y sea arrastrado al agua del río por escorrentía, siendo que a mayor la precipitación, mayor será la escorrentía, en segundo lugar, dado que el mercurio posiblemente se encuentra en las emisiones atmosféricas, la lluvia puede limpiar el aire de las emisiones atmosféricas, capturando los contaminantes e incrementando la concentración de este en el agua de escorrentía y finalmente en el cuerpo de agua receptor.

Tabla 6 Precipitación estación hidrometeorológica de Lenguazaque.

ESTACIÓN EL TRIANGULO			
MES	PRECIPITACIÓN (mm)	Caudal (m ³ /s)	Velocidad (m/s)
FEBRERO	32	0.0666	0.08
MARZO	65	0.0637	0.08
ABRIL	110	0.6267	0.85
MAYO	100	0.2070	0.27

Las concentraciones promedio en las estaciones de muestreo para el periodo de tiempo en el cual se llevo a cabo el proyecto son las que aparecen en la tabla 7.

Tabla 7 Media, desviación estándar (S), error estándar (Sx), valores máximos y mínimos de concentración de mercurio (mg/L) de los puntos de muestro ubicados sobre el río Lenguazaque.

PUNTO DE MUESTREO	n	X	S	Sx	Me	MAX	MIN
1	4	0,1733	0,1771	0,0885	0,152	0,288	0,101
2	4	0,3490	0,3732	0,1866	0,275	0,663	0,183
3	4	0,2298	0,2602	0,1301	0,2297	0,4	0,063
4	4	0,2490	0,3717	0,1858	0,1615	0,565	0,108
5	4	0,4510	0,3366	0,1682	0,4245	0,564	0,391

El valor de las desviaciones estandar de los promedios de las concentraciones de cada punto de muestreo, señalan la gran diferecia o dispersión de los datos en cada punto, hecho que no es necesariamente posible establecer o definir la media en cada punto como un valor preciso.

Dentro de los datos de calidad del agua tomados in situ se encuentra el pH, variable medida debido a que el pH del agua condiciona o determina si el mercurio tiene la tendencia a permanecer en solución y transformarse en metilmercurio (Jiménez Gómez, 2005) o a precipitarse, por otra parte, es necesario recordar que el mercurio en aguas naturales puede presentar tres estados de oxidación (0, +1 y +2) y puede existir de distintas formas dependiendo de la concentración de material particulado, fuerza ionica, carbono orgánico disuelto, temperatura, pH y salinidad del agua (Tavares, et al, 2016), de manera que la determinación de pH puede señalar la tendencia del mercurio a mantener en solución y combinarse para alcanzar su forma

orgánica, o a precipitarse por efecto combinado del pH y sedimentos y tomar su forma orgánica por acción de microorganismos anaerobios, con respecto a lo anterior, es de resaltar que el mercurio tiene baja solubilidad en el agua, pero es adsorbido con facilidad por las partículas suspendidas en el agua (Chen , Chen, & Dong, 2012), De acuerdo con lo anterior, y dado el considerable transporte de sólidos observado en el río, es probable que el lecho contenga mercurio en su forma orgánica.

La ilustración 7, corresponde al punto de muestreo número 2, se puede notar el aspecto turbio del agua, a causa de los sólidos suspendidos, estos en algún tramo o punto léntico se pueden asentar, dando lugar a la formación de depósitos de sedimentos en los cuales el mercurio se transforme a metil mercurio (Lessard, Poulain, Ridal, & Blais, 2014) (Zhao, et al, 2017)



Ilustración 7. Apariencia del agua de río en el punto de muestreo número 2.

Teniendo en cuenta lo expuesto en los párrafos anteriores, se puede señalar que para el rango de valores de pH de las muestras tomadas en el río Lenguazaque, la tendencia del mercurio será a permanecer en su forma oxidada y disueltto en el agua, aunque su permanencia en esta estará afectada por la concentración de sólidos (Ge, et al, 2018) sobre los cuales el mercurio puede ser adsorbido y precipitarse en tramos lénticos del río, afectando su concentración en el agua y aportar o asociar el metal a los sedimentos del río y posibilitando la transformación de este a su forma orgánica por acción bacteriana.

10. CONCLUSIONES

A pesar que el límite de detección del equipo es mayor que las concentraciones reportadas, la detección de mercurio en el agua fue un hecho en cada uno de los puntos de muestreo, así como la tendencia al aumento en concentración de mercurio en el agua a medida que el río se encuentra en el área de influencia de los hornos.

Los datos de concentración reportados fueron consistentes con el régimen de precipitación y caudal del río, es decir, las concentraciones de mercurio fueron mayores para los meses de menor precipitación y caudal del río, excepto para el mes de abril, en el cual la precipitación y caudal del río fue mayor que en los demás meses, lo que lleva a suponer que posiblemente la escorrentía representa una considerable descarga difusa de mercurio al agua del río Lenguazaque.

11.RECOMENDACIONES

En el presente trabajo, se determinó la presencia de mercurio en el agua, a pesar que el límite, se detectó mercurio en todas y cada una de las estaciones de muestreo, hecho que invita a continuar con el monitoreo del agua del río Lenguaque para con instrumentos de medición que permitan ampliar el límite de detección y obtener con mayor precisión la concentración de mercurio en el agua del río Lenguaque, dado el potencial problema de salud pública que representa que el agua contenga mercurio.

Resulta favorable complementar este tipo de estudios con monitoreos de calidad del aire, suelos y sedimentos del río para poder cuantificar con mayor certeza la problemática que puede representar los hornos de coquizado.

12. REFERENCIAS

- Duarte Cubillos, H. (Diciembre de 2011). *Mina Galla y Mina Proyecto, expresión de la territorialidad contruido a partir de la pequeña minería del oro en el Sur de Bolívar*. Potificia Universidad Javeriana . Bogotá: Potificia Universidad Javeriana . Recuperado el 5 de Septiembre de 2016, de <http://repository.javeriana.edu.co/bitstream/10554/2745/1/DuarteCubillosHeimunthAlexander2011.pdf>
- Alfaro Herrera , C. (2011). *Fundación universitaria Unimonsserrate*. Recuperado el 17 de Mayo de 2017, de Fundación universitaria Unimonsserrate: <http://www.unimonsserrate.edu.co/publicaciones/administracion/impacto3/6articulo.pdf>
- AMBIOTEC. (2006). *Cuenca Río Lenguazaque*. Bogotá. Recuperado el 15 de Marzo de 2017
- Antoszczyszyn , T., & Michalska, A. (2017). The potential risk of environmental contamination by mercury contained in Polish coal mining waste. *Journal of sustainable mining*, 191 -196. Recuperado el 20 de Septiembre de 2017
- AOAC. (2007). *OFFICIAL METHODS FOR CHEMICAL ELEMENTS IN FOOD OF ANIMAL ORIGIN*. AOAC International. Recuperado el 24 de Septiembre de 2016
- Ayala Carcedo, F. J. (1988). *Estabilidad de taludes en la minería de hulla y antracita a cielo abierto de españa*. Ciudad Real : Instituti Geológico y Minero de España.
- Baird, C. (2004). *Química Ambiental*. Barcelona: Reverte S.A. Recuperado el 15 de abril de 2017
- Bautista Zuñiga , F. (1999). *Introducción al estudio de la contaminación de suelo por mateles*. Recuperado el 17 de Enero de 2019
- Camprodon , J., Ferreira, M. T., & Ordeix, M. (2012). *Restauración y gestión ecológica fluvial*. Cataluña: Isa press. Recuperado el 15 de Abril de 2017
- CAO. (Julio de 2000). Recuperado el 15 de Febrero de 2017, de <http://hrlibrary.umn.edu/research/Peru-Investigacion%20del%20derrame%20de%20Mercurio.pdf>
- CAR. (2006). *Corporación Regional Autonoma de Cundinamarca*. Recuperado el 20 de Marzo de 2017, de Corporación Regional Autonoma de Cundinamarca: <http://www.aigos.com.co/ubate/FSCCommand/pomcadoc.pdf>

- CAR. (2018). *Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca*. Recuperado el 15 de Septiembre de 2018, de Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca: <http://web2.car.gov.co/>
- Charry Otálora, J., & Riaño Cantor, L. (2015). Perfil Ambiental de la Sub-Cuenca del Río Lenguaque. Bogotá, Colombia. Recuperado el 24 de Enero de 2019
- Chen, C.-W., Chen, C.-F., & Dong, C.-D. (2012). Distribution and Accumulation of Mercury in Sediments of. *APCBEE Procedia*, 153-158. Recuperado el 28 de Enero de 2019
- Congreso de Colombia. (15 de Agosto de 2001). *Secretaria Juridica Distrital*. Recuperado el 17 de abril de 2017, de Secretaria Juridica Distrital: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=9202>
- Corpochivor. (Mayo de 2008). *CORPOCHIVOR*. Recuperado el 18 de Mayo de 2017, de CORPOCHIVOR: <http://fauna.corpochivor.gov.co/wp-content/uploads/2016/04/Estudio-del-estado-actual-del-paramo-de-Rabanal.pdf>
- Cuello Nuñez, S. (2016). *E-prints complutense*. Recuperado el 22 de Septiembre de 2017, de <http://eprints.ucm.es/42588/1/T38771.pdf>
- Daza Cotes, I. (18 de Enero de 2016). Gamarra. En peligro de extinción. *El Pílon*. Recuperado el 12 de Mayo de 2016, de <http://elpilon.com.co/gamarra-en-peligro-de-extincion/>
- DNP. (6 de Agosto de 2013). *Plan para restablecer la navegabilidad del Río Magdalena*. Departamento Nacional de Planeación, Bogotá. Recuperado el Septiembre de 2016, de <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3758.pdf>
- Duffus, J., & Worth, H. (Edits.). (1996). *Fundamental toxicology for chemists*. Cambridge, UK: The royal society of chemistry. Recuperado el 20 de Septiembre de 2016
- El Nacional. (26 de Mayo de 2016). Perú decretó emergencia por contaminación con mercurio en Amazonía. *El Nacional*. Recuperado el 15 de Febrero de 2017, de http://www.el-nacional.com/noticias/mundo/peru-decreto-emergencia-por-contaminacion-con-mercurio-amazonia_28806
- Elosegi, A., & Sabater, S. (2009). *Conceptos y técnicas en ecología fluvial*. España: Rubes Editorial. Recuperado el 15 de Abril de 2017
- EPA. (1994). *Method 245.1: Determination of Mercury in Water by Cold Vapor Atomic Absorption Spectrometry*. Cincinnati, OH. Recuperado el 20 de Julio de 2018

- EPA. (2015). *United States Environmental Protection Agency*. Recuperado el 23 de Enero de 2019, de www.epa.gov
- Fedesarrollo. (Abril de 2008). *Fedesarrollo*. Recuperado el 5 de Septiembre de 2016, de <http://www.fedesarrollo.org.co/wp-content/uploads/2011/08/La-miner%C3%ADa-en-Colombia-Informe-de-Fedesarrollo-2008.pdf>
- Gao, B., Han, L., Hao, H., & Zhou, H. (2016). Pollution characteristics of mercury (Hg) in surface sedimentsof major basins, China. *Ecological Indicators*, 577-585. Recuperado el 27 de Enero de 2019
- Gaona Martínez, X. (2004). *El mercurio como contaminante global: Desarrollo de metodologías para su determinación en suelos contaminados y estrategias para la reducción de su liberación al medio ambiente*. Universitat Autònoma de Barcelona. Recuperado el 1 de Septiembre de 2018
- Garay, C., & Vargas , D. (2013). Hacia el aprovechamiento integral del río magdalena. *Anales de Ingeniería*, 18- 21. Recuperado el Septiembre de 2016
- García , H., & Jiménez, G. (2016). Transverse zones controlling the structural evolution of the Zipaquira Anticline (Eastern Cordillera, Colombia): Regional Implications. *Journal of South American Earth Science*, 243-258. Recuperado el 18 de Mayo de 18
- Garzón Yepes, N. V., & Gutierrez Camargo, J. (2013). *Deterioro de humedales en el magdalena medio: Un llamado para su conservación*. Bogotá: Fundación Alma. Recuperado el 30 de Marzo de 2016, de <http://www.fundacionalma.org.co/index/node/28>
- Garzón Yepes, N. V., & Gutierrez Camargo, J. C. (2013). *Miniatlas de la cuenca media del río magdalena, una mirada a los humedales de la llanura aluvial*. Bogotá: Humbolt; Fundación Alma. Recuperado el 30 de Marzo de 2016, de <http://www.fundacionalma.org.co/index/node/28>
- Ge, M., Liu, G., Liu , Y., Yuan, Z., & Liu, H. (2018). An 87 - year sedimentary record of mercury contamination in the Old Yellow River Estuary of China. *Marine Pollution Bulletin*, 135, 47 -54. Recuperado el 30 de Septiembre de 2018
- Gebka, K., Beldowska, M., Saniewska, D., Kulinski, K., & Beldowski, J. (2018). Watershed characteristics and climate factors effect on the temporal variability of mercury in the southern Baltic Sea rivers. *Journal of Environmental Sciences*, 55-64. Recuperado el 30 de Septiembre de 2018
- Gobernación de Boyacá. (2014). Mapa de riesgo de la calidad del agua para consumo humano del centro urbano del municipio de Chinquiquira - Boyacá. Boyacá, Colombia. Recuperado el 25 de Enero de 2019

- Gochfeld, M. (2003). Cases of mercury exposure, bioavailability, and absorption. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 174-179. Recuperado el 10 de Febrero de 2017
- Grupo Salud Ambiental. (2011). *Manual de Instrucciones para la toma, preservación y transporte de muestras de agua de consumo humano para análisis de laboratorio*. Bogotá D.C. Recuperado el 20 de Mayo de 2018
- Haitzer, M., Aiken, G., & Ryan, J. (2003). Binding of Mercury(II) to Aquatic Humic Substances: Influence of pH and Source of Humic Substances. *Environmental, science and technology*, 2436 - 2441. Recuperado el 18 de Enero de 2019
- Hashemi, M. (2018). Heavy metal concentrations in bovine tissues (muscle, liver and kidney) and. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 263-267. Recuperado el 16 de Enero de 2019
- Humboldt. (2013). *Instituto de Investigaciones de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt*. Recuperado el 20 de Marzo de 2017, de Instituto de Investigaciones de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt: <http://www.humboldt.org.co/es/investigacion/ecosistemas-estrategicos-2/item/559-paramos-y-sistemas-de-vida-rabanal>
- IDEAM. (2007). *Protocolo para el monitoreo y seguimiento del agua*. Bogotá D.C.: Imprenta Nacional de Colombia. Recuperado el 20 de Julio de 2018
- Iriondo, M. H. (2007). *Introducción a la Geología*. Córdoba , Argentina: Editorial Brujas. Recuperado el 15 de abril de 2017
- Jiménez Gómez, A. (2005). Interacción del mercurio con los componente de las aguas residuales. Manizales, Colombia. Recuperado el 18 de Enero de 2019
- Ki Suh, J., Sik Min, H., Kamruzzaman, M., & Hak Lee, S. (2012). Determination of Mercury in Fly Ash by using injection cold vapor isotope dilution inductively coupled plasma mass spectrometry. *Mass Spectrometry letters*. Recuperado el 20 de Septiembre de 2018
- Klages, F. (1968). *Tratado química organica*. Reverté s.a. Recuperado el 5 de Septiembre de 2018
- Lessard, C., Poulain, A., Ridal, J., & Blais, J. (2014). Dynamic mass balance model for mercury in the St. Lawrence River near. *Science of the Total Environment*, 131 -138. Recuperado el 28 de Enero de 2019
- Lominchar , M., Sierra , M., Rodriguez, J., & Millán , R. (2010). *Estudio del comportamiento y distribución del Mercurio presente en muestras de suelo recogidas en la ribera del Río Valdeazogues*. Madrid: CIEMAT. Recuperado el 20 de Septiembre de 2018

- Mahecha, C. M., Chaparro, S. D., Saray, M. A., & Reynoso, K. N. (2016). Evaluación de la contaminación por arsénico y mercurio, derivada de la explotación de carbón en algunas zonas del municipio Guacheta, Cundinamarca. *Ciencia: desarrollo e innovación*, 31 -36. Recuperado el 17 de Mayo de 2017, de <http://www.udca.edu.co/wp-content/uploads/revista-ciencia/revista-ciencia-desarrollo-innovacion-2-1.pdf#page=37>
- Manahan, S. (2003). *Toxicological chemistry and biochemistry* (Third ed.). United States: Lewis publishers. Recuperado el 8 de Septiembre de 2016
- Mancera Rodriguez, N., & Álvarez León, R. (27 de Enero de 2006). *Revistas Unal*. Recuperado el 18 de Septiembre de 2016, de <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/actabiol/article/viewFile/27140/28608>
- Mashyanov, N., Pogarev, S., Panova, E., Panichev, N., & Ryzhov, V. (2017). Determination of mercury thermospecies in coal. *FUEL*. Recuperado el 1 de Septiembre de 2018
- MinAmbiente. (2012). *Diagnostico nacional de salud ambiental*. Recuperado el 24 de Septiembre de 2017
- Minambiente. (15 de Julio de 2013). *Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible*. Recuperado el 17 de Abril de 2017, de Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible: http://www.minambiente.gov.co/images/Atencion_y_participacion_al_ciudadano/Consulta_Publica/LEY%201658%20DEL%2015%20DE%20JULIO%20DE%202013.pdf
- Minambiente. (8 de Abril de 2016). *Asociación Nacional de Empresarios de Colombia*. Recuperado el 17 de abril de 2017, de Asociación Nacional de Empresarios de Colombia: <http://www.andi.com.co/Ambiental/SiteAssets/Resolucion%20565%20sobre%20registro%20usuarios%20de%20mercurio.pdf>
- Minminas. (Noviembre de 2014). *Ministerio de Minas y Energía*. Bogota . Recuperado el 14 de abril de 2017, de Ministerio de Minas y Energía.
- Minminas. (Abril de 2016). *Ministerio de Minas y Energía*. Recuperado el 14 de abril de 2017, de Ministerio de Minas y Energía: <https://www.minminas.gov.co/documents/10180/698204/Pol%C3%ADtica+Minera+de+Colombia+final.pdf/c7b3fcad-76da-41ca-8b11-2b82c0671320>
- Mongabay Latam. (25 de Febrero de 2018). *MONGABAY*. Recuperado el 07 de Enero de 2019, de MONGABAY: <https://es.mongabay.com/2018/02/mercurio-en-latinoamerica/>

- Moraes, P., Santos, F., Cavecci, B., Padilha, C., Vieira, J., Roldan, P., & Padilha, P. (2013). GFAAS determination of mercury in muscle samples of fish from Amazon, Brazil. *Food Chemistry*, 2614 -2617. Recuperado el 20 de Septiembre de 2018
- Mugica, V., Amador, M. A., Torres, M., & Figueroa, J. d. (2002). *Redalyc*. Recuperado el 20 de Septiembre de 2017, de <http://www.redalyc.org/html/370/37019205/>
- Olivero Verbel, J. (s.f.). *UPME*. Recuperado el 8 de Septiembre de 2016, de UPME: http://www1.upme.gov.co/sites/default/files/forum_topic/3655/files/efectos_mineria_colombia_sobre_salud_humana.pdf
- OMS. (2003). *Elemental mercury and Inorganic mercury compounds: Human health aspects*. World Health Organization, Atlanta. Recuperado el 10 de Febrero de 2017
- OMS. (2008). *Organización mundial de la salud*. Recuperado el 22 de Septiembre de 2017, de http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/78130/1/9789243596570_spa.pdf?ua=1
- OMS. (Enero de 2016). *Organisation mondiale de la Santé*. Recuperado el 20 de Septiembre de 2016, de <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs361/fr/>
- Orjuela, L., Saldarriaga, G., Garcia, M., & Wilches, H. (2010). Calidad del agua superficial en Colombia. En Ideam, *Estudio Nacional del agua 2010* (págs. 230-280). Recuperado el 12 de Septiembre de 2017, de <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021888/CAP6.pdf>
- Patiño, E. (12 de Enero de 2014). *El Heraldo*. Recuperado el 25 de Diciembre de 2018, de El Heraldo: <https://revistas.elheraldo.co/latitud/el-mercurio-fluye-por-el-magdalena-129773>
- PERKINELMER. (1995). *MANUAL*. Recuperado el 20 de Julio de 2018
- Poulin, J., & Gibb, H. (2008). *Organización Panamericana de la Salud*. (A. Pruss-Ustun, Ed.) Recuperado el 24 de Septiembre de 2017, de Organización Panamericana de la Salud: http://www.paho.org/col/index.php?option=com_docman&view=download&category_slug=publicaciones-ops-oms-colombia&alias=1593-mercurio-carga-enfer&Itemid=688
- Rahman, Z., & Singh, V. P. (2016). Assessment of heavy metal contamination and Hg-Resistant bacteria in surface water from different regions of Delhi, India. *Saudi Biological Society*. Recuperado el 10 de Febrero de 2017

- Ramirez Baquero, S. (10 de Febrero de 2018). *Semana Sostenible*. Recuperado el 07 de Enero de 2019, de *Semana Sostenible*: <https://sostenibilidad.semana.com/actualidad/articulo/cienaga-de-ayapel-territorio-ramsar-amenazado-por-la-mineria-y-ganaderia/39465>
- Redacción Vivir. (8 de Mayo de 2013). El monstruo dormido en Segovia. *El Espectador*. Recuperado el 15 de Febrero de 2017, de <http://www.elespectador.com/noticias/actualidad/vivir/el-monstruo-dormido-de-segovia-articulo-421016>
- Rodriguez Martín-Doimeadios, R. C., Mateo, R., & Jimenez-Moreno, M. (2017). Is gastrointestinal microbiota relevant for endogenous mercury methylation in terrestrial animals? *Environmental Research*, 454-461. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.06.018>
- Rojas, E., & Carrero, P. (2009). *Determinación de mercurio orgánico e inorgánico en sangre completa*. Académica Española. Recuperado el 24 de Septiembre de 2017
- Ruiz Chaves, I. (2016). Metodologías analíticas utilizadas actualmente para la determinación de mercurio en músculo de pescado. *Pensamiento Actual*, 113-122. Recuperado el 1 de Septiembre de 2018
- Sánchez Galvis, S. L., & Toncón Leal, C. F. (2015). *Repositorio institucional Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano*. Recuperado el 30 de Septiembre de 2018, de Repositorio institucional Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano: <https://expeditiorepositorio.utadeo.edu.co/bitstream/handle/20.500.12010/2677/ADSORCI%C3%93N%20DE%20Hg%28II%29%20CON%20CARB%C3%93N%20ACTIVADO%20OBTENIDO%20A%20PARTIR%20DE%20CASCARILLA%20DE%20CAF%C3%89%20PRETRATADA%20CON%20EXPLOSI%C3%93N%20DE%20VAPOR%20%20>
- Semana. (8 de Noviembre de 2017). *Semana*. Recuperado el 5 de Septiembre de 2018
- SGC. (Abril de 2012). *Servicios Geológico Colombiano*. Recuperado el 20 de Marzo de 2017, de Servicios Geológico Colombiano: <https://www2.sgc.gov.co/Inicio/Gas-Metano-asociado-al-Carbon/Archivos/EXPLORACIONGMAC-CHECUA-LENGUAZAQUE-SECTOR-TAUSA-LA.aspx>
- Sosa Echeverria, R., Bravo Alvarez, H., Fuente García , G., Rosas de Alva , S., Granados Hernandez , E., & Sánchez Alvarez, P. (2016). Estimación de emisiones de Mercurio en las plantas carboeléctricas de México. *Revista Internacional Contaminación Ambiental*, 325-336. Recuperado el 21 de Septiembre de 2017

- Sundseth, K., Pacyna, J. M., Pacyna, E., Pirrone, N., & Thorne, R. (22 de Enero de 2017). *MDPI*. Recuperado el 12 de Marzo de 2017, de MDPI: <http://www.mdpi.com/1660-4601/14/1/105/htm>
- Tapia, C. (2009). *Instituto de Investigaciones de Recursos Bilógicos Alexander Von Humboldt*. Recuperado el 20 de Marzo de 2017, de Instituto de Investigaciones de Recursos Bilógicos Alexander Von Humboldt: <http://www.humboldt.org.co/es/test/item/352-plan-participativo-de-manejo-y-conservacion-del-macizo-del-paramo-de-rabanal>
- Tavares, D., Lopes, C., Daniel-da-Silva, A., Vale , C., Trindade , T., & Pereira, M. (2016). Mercury in river, estuarine and seawaters e Is it possible to decrease. *Water Research*, 439-449. Recuperado el 28 de Enero de 2019
- Union Temporal Audicom Ambiotec. (2006). *ELABORACIÓN DE LOS ESTUDIOS DE DIAGNOSTICO PROSPECTIVA Y FORMULACIÓN*. Recuperado el 10 de Abril de 2017
- UPME. (2006). *Ministerio de Minas y Energía*. Recuperado el 14 de abril de 2017, de Ministerio de Minas y Energía : https://www.minminas.gov.co/documents/10180/412670/PNDM_2019_Final.pdf
- UPME. (2012). *Unidad de Planeación Minero Energetica*. Recuperado el 16 de Marzo de 2017, de Unidad de Planeación Minero Energetica: http://www.upme.gov.co/guia_ambiental/carbon/areas/zonas/indice.htm
- UPME. (2014). *Sistema de información Minero Colombiano*. Recuperado el 14 de abril de 2017, de Sistema de Información Minero Colombiano: http://www.simco.gov.co/Portals/0/Analisis%20Sectorial/INDICADORES_24_06_2013.pdf
- UPME. (2015). *Incidencia real de la minería del carbón, del oro y del uso del mercurio en la calidad ambiental con énfasis especial en el recurso hídrico - Diseño de herramientas para la planeación sectorial*. UPME. Recuperado el 7 de Enero de 2019
- Vega Bolaños, L., Arias Verdés , J., Beltrán Llerandi , G., Castro Díaz , O., & Moreno Tellez, O. (2000). Validación de un método para determinar metilmercurio en tejido de pescado por cromatografía de gases. *Revista Cubana de Alimentación y Nutrición*, 14. Recuperado el 25 de Septiembre de 2016, de http://bvs.sld.cu/revistas/ali/vol14_2_00/ali05200.htm
- Villardy Quiroga, S., Cortés-Duque , J., Jaramillo , U., Florez, C., Estupiñan, L., Aponte , C., . . . Gutierrez Camargo, J. C. (2014). *Fundación Alma*. Recuperado el 30 de Marzo de 2016, de <http://www.fundacionalma.org.co/index/node/28>

- Voros, D., Diaz Somoano, M., Gerslova, E., Sykorova, I., & Suarez-Ruiz, I. (2018). Mercury contamination of Stream Sediments in th north bohemian coal district (Czech Republic): Mercury Speciation and the Role of organic matter. *Chemosphere*. Recuperado el 30 de Septiembre de 2018
- Wang, S., & Luo, K. (2017). Atmospheric emission of mercury due to combustion of steam coal. *Atmospheric Environment*, 45-54. Recuperado el 27 de Enero de 2019
- Weinberg, J., & IPEN. (2010). *Introducción a la contaminación por Mercurio para las ONG*. International POPs Elimination Network. Recuperado el 8 de Septiembre de 2016
- Xu, P., Luo, G., Zhang, B., Zeng , X., Xu, Y., Zou, R., . . . Yao , H. (2017). Influence of low pressure on mercury removal from coals via mild pyrolysis. *Applied Thermal Engineering*, 113. Recuperado el 30 de Septiembre de 2018
- Yu, M.-H., Tsunoda, H., & Tsunoda, M. (2011). *Enviromental toxicology: Biological and Health Effects of Pollutants*. Boca Ratón: CRC Press - Taylor & Francis Grou. Recuperado el 12 de Marzo de 2017
- Zhao, L., Guo, Y., Meng, B., Yao, H., & Feng, X. (2017). Effects of damming on the distribution and methylation of mercury in. *Chemosphere*, 780-788. Recuperado el 29 de Enero de 2019
- Zhao, S., Duan, Y., Yao, T., Liu , M., Lu, J., Tan , H., . . . Wu, L. (2017). Study on the mercury emission and transformation in a ultra-low emission coal-fired power plant. *Fuel*, 653-661. Recuperado el 20 de Septiembre de 2017